南方蓝莓智能温室促早熟生产多因子协调控制技术

徐立鸿*，刘辉辉，徐　赫，蔚瑞华，蔡文韬

（同济大学 电子与信息工程学院，上海 201800）

摘　要：为达到蓝莓提前上市、获得更大经济效益的目的，本团队将南方蓝莓移至环境可控型智能温室中试验生产，探索研究出南方蓝莓智能温室促早熟生产控制技术。首先从蓝莓物候期、品种特点、土壤pH、水肥灌溉方式、小气候环境区间等方面进行了较为详细全面的调研与总结，明确了无土栽培蓝莓全周期管理要点和环境调控范围；接着基于Venlo型温室对蓝莓生产做布局，并基于物联网技术，建立蓝莓植物工厂化生产控制系统，串联硬件层、软件层和云端，实现现场端环境检测调控、数据云存储与远程控制等技术；在温室环境多因子协调控制模型基础上，针对蓝莓生长环境特点，探索研究了一套蓝莓温室多因子协调控制算法，用于环境调控。试验温室位于江苏省苏州市昆山市花桥镇东南部。经实际验证，整体调控系统效果显著，并于2021年5月初采收了第一波果实，使南方品种蓝莓提早近一个月进入果实采摘期。其中相比未蓄冷的蓝莓植株，蓄冷后的"明星""绿宝石""蓝美1号""海岸"单株产量分别增加51.5%、85.5%、43.8%和94.7%，单果重量分别增加10.9%、7.2%、2.6%和5.3%。试验证明采用多因子协调控制算法进行调控能够提高蓝莓的产量和品质，取得显著经济效益，为南方温室蓝莓植物工厂化促早熟生产管理提供示范。

关键词：蓝莓；栽培管理；植物工厂；促早熟；生产控制系统；多因子协调控制算法；物联网

中图分类号：S625.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**202109-SA007

引用格式：徐立鸿, 刘辉辉, 徐赫, 蔚瑞华, 蔡文韬. 南方蓝莓智能温室促早熟生产多因子协调控制技术[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(4): 86-98.

XU Lihong, LIU Huihui, XU He, WEI Ruihua, CAI Wentao. Multi-factor coordination control technology of promoting early maturing in southern blueberry intelligent greenhouse[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(4): 86-98. (in Chinese with English abstract)

1　引　言

蓝莓，又名越橘，为杜鹃花科越桔属多年生低灌木，被联合国粮食及农业组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations，FAO）评为人类五大健康食品之一[1]。作为一种附加价值很高的鲜果作物，近些年来随着市场的扩大，其经济效益也十分可观。

与其它果蔬相比，蓝莓种植不仅需要适宜的温度、湿度、光照和CO_2等气候环境，还具有抗旱性差、需要酸性土壤和肥水环境、低温积累、光饱和点低等生产要素特点。目前中国大多数蓝莓生产基地都采用露天土培，或是简单的陆地设施栽培，无法达到植物工厂的生产水准，也不适宜形成规模化的智能种植基地[2]，这使得蓝莓在一些气候不适宜的区域引种困难重重，且少有文献或报道提及高端温室种植生产蓝莓的控制措

收稿日期：2021-09-17　修订日期：2021-11-18

基金项目：上海市科委创新行动计划项目（17391900900）；国家自然科学基金项目（61973337）

*通信作者：徐立鸿（1960—），博士，教授，研究方向为温室环境建模与控制、预测控制和智能控制。电话：17321126466。E-mail：xulihong@tongji.edu.cn。

施。在上海地区，土壤偏碱性、低温期较短，还有一段较长的阴雨黄梅天气等特殊气候，这些问题都制约着上海的蓝莓种植产业。解决上述问题的方案是，使用高端设施农业手段，规避由地理限制引发的“瓶颈”。

植物工厂是现代农业发展的高级阶段，它通过计算机控制系统对设施内植物生长发育过程的温度、湿度、CO_2浓度和营养液环境条件进行高精度控制，实现农作物周年连续生长的高效农业生产系统[3-5]，可以作为南方蓝莓规模化生产的方式。另外，上海及周边地区陆地栽培蓝莓成熟期大致在6月中下旬至8月，而蓝莓植物工厂化的生产种植模式可以通过合理调控其生长环境，达到蓝莓提前上市、增加其市场经济价值的目的。近年来，温室栽培的蓝莓果实单价可高达150～200元/kg，越早进入市场，经济效益越高[6]。因此利用植物工厂化调控手段进行调控，提早上海地区蓝莓成熟时间具有重要意义。

为达到蓝莓提前上市、获得更大经济效益的目的，本研究设计并实现了一套蓝莓智能温室物联网调控系统，将南方蓝莓移至环境可控型智能温室中进行试验生产。结合上海地区蓝莓种植经验，从物候期、品种特点、土壤pH、水肥灌溉方式、小气候环境区间等方面进行调研与总结，为后续蓝莓环境调控提供重要依据。基于蓝莓物候期环境特点，在温室环境多因子协调控制模型基础上[7]，研究了一套蓝莓温室环境多因子控制算法进行调控。通过实现并总结蓝莓全周期植物工厂化生产技术，能有效减少蓝莓种植过程中的病虫害发生率等问题，增加产量、果实的商品价值和质量，提高蓝莓种植的地域适应性，解决区域地理条件对蓝莓生产的制约，最终实现蓝莓提前上市，提高蓝莓市场经济效益。

2 蓝莓智能温室总体设计概要

2.1 蓝莓生产要素

蓝莓是一种对生长气候环境如温度、湿度、光照和CO_2等生产要素要求较为严苛的周年生作物，且通常具有抗旱性差、需要酸性土壤和肥水环境、低温积累、光饱和点低等生产要素特点。不同品种的蓝莓对生产要素要求差别极大。因此，为了达成促进蓝莓提早成熟上市的目的，在构建蓝莓植物工厂化生产型温室前，对蓝莓物候期、品种、土壤、水肥、气候要素等进行充分调研是必要的。

蓝莓物候期大体分为萌芽期、花期、果期、花芽分化期及休眠期几个节点。从品种角度可以将蓝莓大致分为四类，分别为抗寒性强、需冷量高、喜欢冰凉天气的北高丛蓝莓，适宜在南方种植、需冷量低、喜欢湿润、温暖气候条件的南高丛蓝莓，北高丛蓝莓与野生种矮丛越橘杂交、需冷量很高、抗寒力极强的半高丛蓝莓，以及树体高大、寿命长、不耐寒、抗湿热、对土壤酸性要求稍低、需冷量相比南高丛蓝莓较多的兔眼蓝莓。

蓝莓有需冷量的要求，需冷量为蓝莓正常开花结果需要的有效低温（0～7.2 ℃）累积时间，一般以小时为单位[8]。当环境未达到蓝莓需冷量时，蓝莓花芽分化会受到很大影响，导致开花坐果率严重下降，产量大幅降低[9]，严重影响经济效益。上海市属亚热带季风性气候，四季分明，日照充分，然而低温期较短，还有一段较长的阴雨黄梅天气等特殊气候，自然条件下能满足蓝莓需冷量的时间短[10]，因此应该选取需冷量低的蓝莓品种在上海地区栽种。结合现有文献研究[11,12]。本研究从“南高丛”中选取具有代表性的品种，并考虑其结果时期，形成可以在温室中相继成熟的种植组合进行实际生产，所选品种分别为“明星”“绿宝石”“海岸”和“蓝美1号”。

土壤方面，土壤pH是蓝莓生长栽培的最大限制因素[13]。土壤pH过高或是过低，都会影响蓝莓的正常生长发育及其生理代谢过程[14]，导致蓝莓在生长过程中对水分营养吸收不良，引起生长缓慢、叶片发黄变小、产量降低等状况，因此蓝莓种植土壤pH范围应为4.5～5.5。此外，蓝

莓根系大多分布于浅层土壤中[15]。土壤通透性不足、容重过高或者排水性不佳，对蓝莓根系的生长十分不利，采用无土栽培技术[16]营造蓝莓生长土壤微环境可以有效解决土壤养分不足等问题[17]，促进蓝莓呼吸和吸收矿物元素[18]，并且有利于精准化管理，不受地域土地状况的限制，促进蓝莓标准化生产[19]。本次试验采用泥炭土为主的营养土。

灌溉方面，蓝莓的根系喜水而怕涝，不当的灌溉措施会导致蓝莓植株干旱，并且水分的胁迫能力差，容易造成产量及蓝莓生长过程中不可逆的损失[20]。综合文献[18,21-23]，可得出蓝莓灌溉规律为：休眠期前浇灌越冬水，期间降低灌溉频率；催芽期间保持土壤湿度在60%～70%，避免灌溉次数过多；花果期少量多次灌溉，防止延长花期，且膨果期需水量最大，要保证供水充足；采摘后土壤湿度在40%～60%，以便晚秋期促使蓝莓重新进入休眠。在全周期的灌溉中，不得使用自来水，否则会致使蓝莓氯中毒，无法正常生长。在灌溉方式上不宜直接将水洒在花期、叶片上，阻碍授粉和坐果[20]。滴灌具有精量、可控的优点[24-26]，故本试验采用滴灌方式进行灌溉。

2.2 生产温室规划构建

2.2.1 温室概况

本设计实施的试验温室位于江苏省苏州市昆山市花桥镇东南部（121°11′E，31°33′N），处于苏沪交界地段，东边接壤上海市嘉定区安亭镇和太仓市城厢镇，南邻上海市青浦区。试验温室所处地域属于北亚热带南缘，盛行东南亚季风。气候温和、湿润，四季鲜明，光照充足，雨量充沛。年平均温度约16.7 ℃。

试验温室为典型Venlo型小玻璃温室，结构如图1所示。基本尺寸为：檐口高5.9 m，试验温室跨度17 m，开间17.5 m，脊高7.2 m，檐高5.7 m，温室总体积1918.875 m³。

该温室的调控设备主要有：

（1）天窗：自然通风，调节温室内部的温度与湿度；

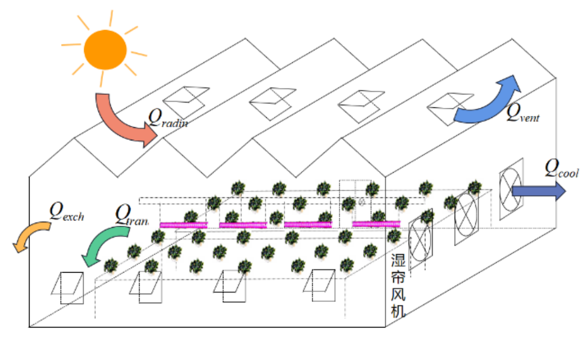


图1 试验温室结构图

Fig. 1 Structure diagram of the experimental greenhouse

（2）侧窗：自然通风，调节温室内部的温度与湿度；

（3）湿帘风机：降温、增湿；

（4）内保温网：保温，防止春寒温度低影响蓝莓生长；

（5）内遮阳网：调节光照与室内温度；

（6）空调：降温/升温，调节室内温湿度；

（7）补光灯：增加蓝莓生长季的光照；

（8）气肥施放：增加二氧化碳浓度；

（9）灌溉系统：浇水、施肥、灌酸。

2.2.2 全周期调控目标

本研究使用温室多因子协调控制算法进行温室环境调控。温室多因子协调控制算法的调控目的在于使温室环境主要因子，如温度、湿度、光照强度和CO_2浓度保持在作物生长适宜范围内。根据上海某合作社多年生产蓝莓的经验和相关文献[6,8,27,28]参考，可以确定蓝莓全周期生长的适宜气象环境条件，如表1所示。此处以“南高丛”品种蓝莓种植为例。

蓝莓与其他作物不同点在于，它在休眠期需要保障充足的需冷量和低光照。催芽期作为休眠期与生长期之间的过渡阶段，需要使温度渐进升高。在整个蓝莓的花果生长期中，夜间需要维持在10 ℃以上，防止蓝莓因为温度过低停止生长，耽误果实成熟的时期。此外，也应保持花果期的昼夜温差，增加果实甜度。

实际温室在调控中，需要对上述种植经验进行总结，合理划分每个生长阶段每日的温度区

表 1　南高丛蓝莓全周期生长适宜环境条件

Table 1 Optimal environmental conditions for the full-cycle growth of Southern Highbush Blueberry

物候期	温度要求/℃		湿度/ %	光照/lux	CO_2浓度/ ‰
	日间	夜间			
休眠期 11 月—1 月	<7.2		60～80	<3000	
催芽期 1 月	20～25	>8	60～80		
生长期 1 月—2 月	20～28	>10	60～80		0.350～0.700
开花期 2 月—3 月	22～32	>10	50～70	30,000～50,000	
果期 4 月—7 月	25～35	15～22	60～80		
花芽分化期 8 月—10 月	22～32	13～20	50～70		

间。由于蓝莓本身存在一定的耐高温性，结合节能因素与温室设施结构，可以在不超过临界温度的前提下适当扩大蓝莓适宜温度的范围。

3　温室物联网智能控制系统

近些年，随着物物互联通信技术、传感器与信息融合处理等技术的不断提升，物联网被广泛应用在各个领域中。在农业领域，随着智慧农业在各地的持续推进，温室物联网技术作为产业智能化发展在工程落地上的关键，引起了许多研究者的重视[29-31]。因此，针对蓝莓工厂化生产，本研究设计并实现了一套基于物联网的信息采集与控制系统，提出了有效的蓝莓温室环境多因子协调控制算法，并分别从整体系统架构、系统硬件设计与系统控制软件设计三个方面展开介绍。

3.1　系统架构概述

根据蓝莓生产实际需求，将温室控制系统整体分为软件层和硬件层两部分，其总体架构如图 2 所示。

其中，硬件端主要由环境数字传感器节点和执行机构控制器组成，由 RS485 总线进行信息汇总。软件端则由三部分组成，分别是现场控制基站端、上位机汇总端和云服务端。

3.2　系统硬件设计

系统硬件总体分为传感器部分和执行机构部分。本系统对温室传感器采取了统一管理，使用了 Zigbee 数据采集网关，对传感器进行节点组

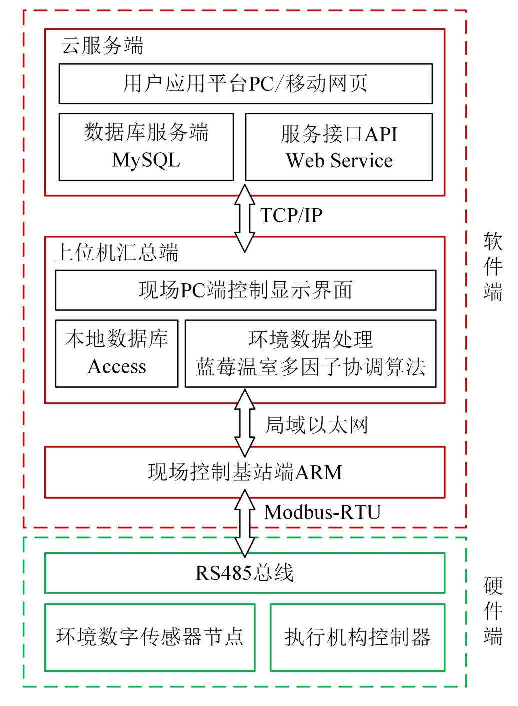


图 2　温室控制系统整体架构

Fig. 2 Overall architecture of greenhouse control system

网。节点现场端汇总布置如图 3 所示。主要包含数据采集柜，室内温度、湿度、光照、CO_2传感器以及土壤温度、湿度、EC 值、pH 传感器。

温室控制系统分为气候环境子系统和灌溉子系统。其中气候环境子系统中包含光照调控、温度调控、湿度调控、CO_2调控部分；灌溉子系统中包含灌水、灌肥和灌酸。本研究所用的温室执行机构从运行状态可以分为两类，分别是二态执行机构与三态执行机构。二态执行机构只有开和关两种状态，其主要以继电器为控制器，比如补



(a)数据采集柜



(b)传感器

注：1. 光照传感器 2. 温湿度传感器 3. CO_2传感器

图3 蓝莓智能温室传感器节点现场图

Fig. 3 Field diagram of blueberry intelligent greenhouse sensor nodes

光灯管、湿帘风机等；三态执行机构具有开、关、停三种工作状态，分别对应执行电机的正转、反转和停止，比如内遮阳网、内保温网、天窗等。

3.3 系统软件设计

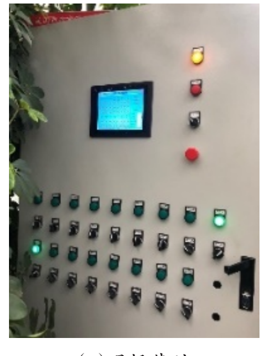
蓝莓生产温室控制系统软件部分共分为三部分，分别是现场控制基站端、上位机汇总端和云服务器。现场控制基站端主要是以ARM系列芯片为核心处理器的嵌入式系统，基于MODBUS-RTU协议，通过RS485接口连接现场执行机构控制继电器口与分布式传感器节点；上位机汇总端使用C++编写，对下通过TCP协议与控制基站通信，并将信息发送至云服务器端；温室云服务器端基于Python的Flask框架，通过TCP/IP协议与上位机交换信息，前端界面则基于JQuery框架，为使用者提供监测与下达控制指令的交互界面。

4 控制算法与实际生产效果

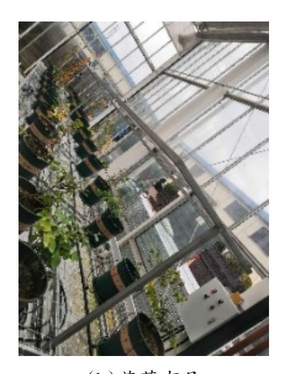
4.1 系统应用实现

该控制系统已经在江苏昆山市花桥镇的小型Venlo型温室内成功运行近两年。系统软件与硬件端均已一一对应连接，实现算法与执行的协同。

温室现场如图4所示，分别为温室强电控制柜、现场控制基站端和温室蓝莓实际生产园区。本研究基于物联网的蓝莓植物工厂化生产控制系统，不仅兼容了手动控制，还可以正常运行其核心的多因子协调控制算法，对蓝莓温室调控进行了自动化管理，为相关理论优化的发展提供了试验平台与数据来源。



(a)现场基站



(b)蓝莓布局



(c)蓝莓补光

图4 蓝莓种植试验温室现场布局

Fig. 4 Blueberry planting experimental greenhouse site layout

上位机汇总端的界面主要包含主页面、节点数据显示、数据通信界面和算法参数设置页面，使用者可以较为详细地查看试验温室内的环境数据与执行机构状态数据，并灵活改变参数。如图5所示。

4.2 多因子协调控制算法

4.2.1 算法基本原理和思想

温室环境具有温、光、湿、气（CO_2）多个环境因子耦合的特点，传统的阈值控制都是基于



(a)上位机界面

(b)远程云终端界面

图 5　蓝莓智能温室软件界面

Fig. 5　Blueberry intelligent greenhouse interface of software

单因子的阈值控制，无法使多个耦合的环境因子同时被调控到适宜的目标范围。为此，本研究提出了温室环境多因子协调控制算法 [7]。该算法的核心思想是对温室加热、通风等所有的控制执行机构设定独立的控制方式，每个执行机构控制动作（变量阈值）以温度为主要环境因子而确定，其他环境因子如光、湿、气（CO_2）根据协调模型与温度主环境因子进行协调，以此对温度阈值进行动态修正，得到执行机构 的动作变量值。

4.2.2　算法基本控制模型

多因子协调控制模型为公式（1）：

$$U(X) = \alpha \cdot F\left(T_{set}, H_{set}, R_{set}, P_{set}\right) + \beta \cdot G\left(t_{in}, h_{in}, r_{in}, p_{in}\right) + \gamma \cdot H\left(t_{out}, h_{out}, r_{out}, p_{out}, W_{rain}, F_v, F_d\right) \quad (1)$$

其中，U为各执行机构动作的调控变量；X为与环境目标设定值、室内气候环境等相关的变量；等式右边为三类协调函数，α、β、γ为其对应权值；F为温室环境目标设定值的函数，其中T_{set}为温度设定值，℃；H_{set}为湿度设定值，%；R_{set}为光照设定值，lux；P_{set}为CO_2浓度设定值，‰，随作物生长的阶段不同、每天时间段的不同而变化；G为室内气候环境状态的函数，表征室内气候环境因子的协调作用，其中t_{in}为室内温度，℃；h_{in}为室内湿度，%；r_{in}为室内光照强度，lux；p_{in}为室内CO_2浓度，‰；H为室外气候环境因素干扰的函数，表征室外气象环境因子的协调作用，其中t_{out}为室外温度，℃；h_{out}为室外湿度，%；r_{out}为室外太阳光照强度，lux；p_{out}为室外CO_2浓度，‰；W_{rain}为雨量，mm/min；F_v为风速，m/s；F_d为风向，(°)。

以上公式（1）等式右边的环境或气象因子间的协调函数的确定以实际温室作物生产的经验为依据，通过实际数据的挖掘建模得到。

下面以蓝莓温室天窗启闭执行机构的自然通风控制为例，说明如何得到其多因子协调控制算法。

根据公式（1），在天窗通风控制中，以通风温度为主要环境因子来考虑天窗控制的阈值。当室内温度达到通风温度的阈值时，开启天窗进行通风，天窗开度的大小随着室内外温度值的增大而变大直至全开。根据多因子协调控制模型，通风温度V_t按公式（2）计算：

$$V_t = Vt_i + \Delta Vt_h + \Delta Vt_{Rad} + \Delta Vt_{RadSum} \quad (2)$$

其中，V_t为通风温度，℃；Vt_i为各时段的初始通风温度，℃；ΔVt_h为室内湿度修正，℃；ΔVt_{Rad}为瞬时光照修正，℃；ΔVt_{RadSum}为光照累积修正，℃。

初始通风温度Vt_i的选取主要与室内温度在各时段的设定值有关，室内湿度、光照、光照累积作为次要环境因子对初始通风温度进行修正，修正量ΔVt_h、ΔVt_{Rad}、ΔVt_{RadSum}均按公式（3）

计算。

$$\Delta Vt_x[℃]=f(x)=\begin{cases}\mathrm{Max}\Delta Vt_x & x<X_{Low}\\ -A\cdot x+B & x\in[X_{Low},X_{High}]\\ \mathrm{Min}\Delta Vt_x & x>X_{High}\end{cases}\tag{3}$$

其中，自变量x分别为室内相对湿度H_{in}，%；光照R_{Sun}，lux；以及累积光照R_{SunSum}，J/m^2。

各个环境因子对通风温度的修正如图6所示。图6（a）为湿度修正通风温度，其中$\mathrm{Max}\Delta Vt_h$为低湿度最大正影响，℃；$\mathrm{Min}\Delta Vt_h$为高湿度最大负影响，℃；图6（b）为光照修正通风温度，其中$\mathrm{Min}\Delta Vt_{rad}$为光照最大负影响，℃；图6（c）为光照累积（当天累积的光照）对通风温度的影响，其中$\mathrm{Min}\Delta Vt_{radsum}$为光照累积最大负影响，℃。这些参数初始值可以根据经验选取，然后在控制系统现场调试中根据控制性能反馈最后确定，也可以考虑根据相关作物模型优化选取。

天窗开度U_{roof}的计算示意图如图7所示：

图7中，温度带T_b，℃的修正遵循公式（4）：

$$T_b=T_{b0}+\Delta T_{bTOut}+\Delta T_{bWind}\tag{4}$$

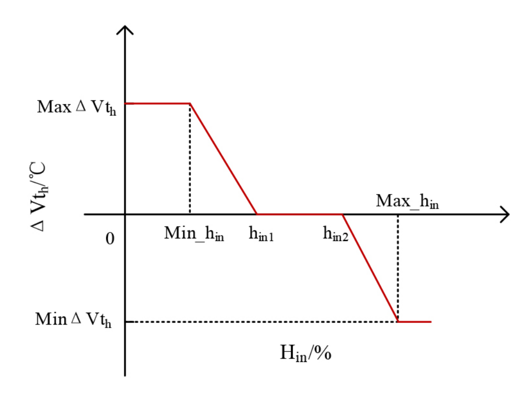
其中，T_b为温度带，℃；T_{b0}为初始设定温度带，℃；ΔT_{bTOut}为室内外温度差修正项，℃；ΔT_{bWind}为室外风速修正项，℃。

ΔT_{bTOut}和ΔT_{bWind}对温度带的修正如图8所示。

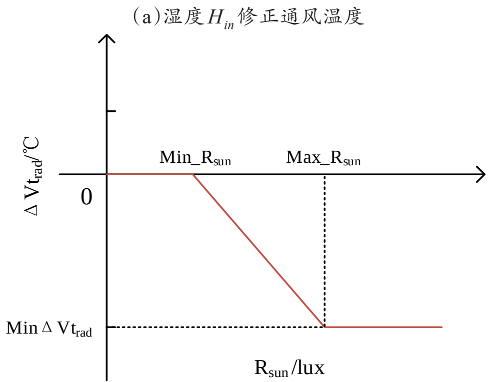
根据温度带T_b、修正后的通风温度V_t和室内温度V_{in}计算天窗开度U_{roof}：

$$U_{roof}=\begin{cases}10\%, & V_{in}\le V_t\\ 100\%, & V_{in}\ge V_t+T_b\\ (V_{in}-Vt)/T_b\times 90\%+10\%, & V_t<V_{in}<V_t+T_b\end{cases}\tag{5}$$

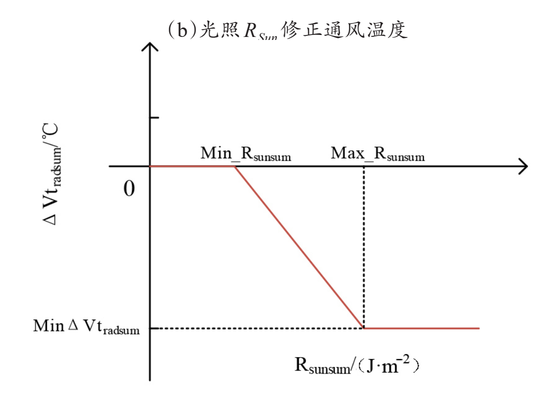
当天窗全开启时，室内温度若还高于温度设定值范围，则拉上遮阳网、开启侧窗予以加大通风对流力度。如果通风仍无法降低室内温度，则关闭温室所有的天窗、侧窗，开启湿帘风机予以调控。



（a）湿度H_{in}修正通风温度



（b）光照R_{Sun}修正通风温度



（c）光照累积R_{SunSum}修正通风温度

图6　影响因子对通风温度的修正

Fig. 6 Correction of influence factors to ventilation temperature

其他温室执行机构如加热设备等的控制阈值变量计算，仍根据多因子协调控制模型公式（1）得到，与以上天窗的通风控制阈值变量的计算类似，不再赘述，详见文献［7］。控制算法的调控流程如图9所示。

4.2.3　实际调控效果

根据实际蓝莓温室生产经验，制定相应的控

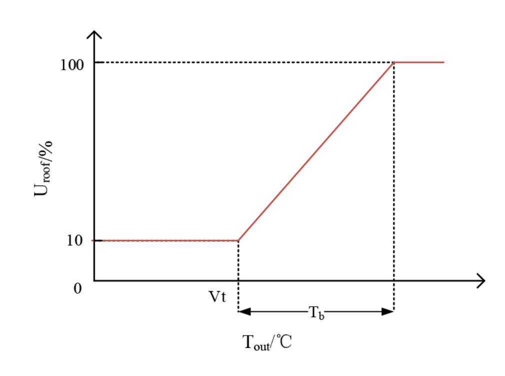
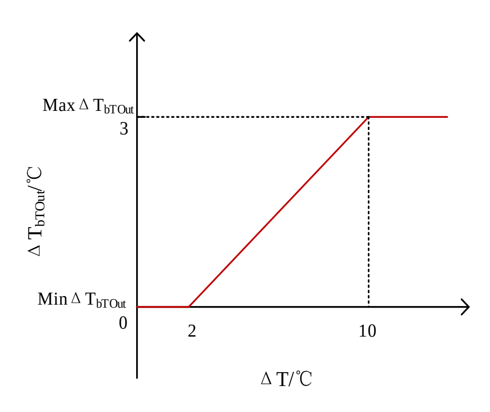
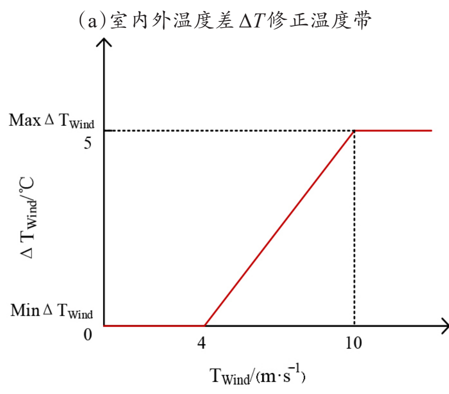


图 7　温室天窗开度 U_{roof} 示意图

Fig. 7　Schematic diagram of greenhouse skylight opening



(a)室内外温度差 ΔT 修正温度带



(b)室外风速 T_{Wind} 修正温度带

注：ΔT 为室内与室外的温度差，℃；T_{Wind} 为室外风速，m/s

图 8　室内外温度差 ΔT、室外风速 T_{Wind} 对温度带的修正

Fig. 8　Correction of outdoor temperature and outdoor wind speed to temperature zone

制策略，通过设定室内外环境数据的报警上下限实现对异常天气进行监测。根据蓝莓生长周期中不同阶段的生长需求设定对应的调控参数，通过

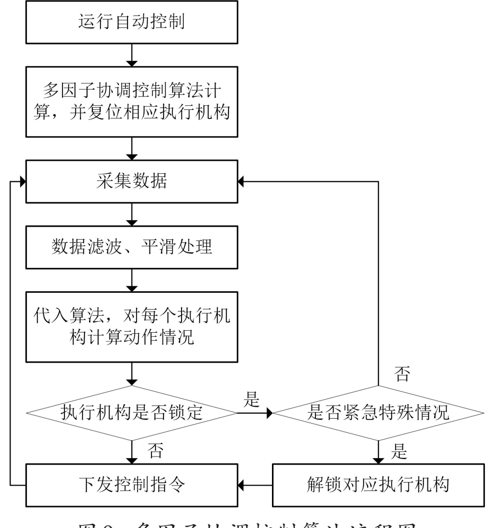


图 9　多因子协调控制算法流程图

Fig. 9　Flow chart of multi-factor coordinated control algorithm

对温室内不同执行机构的状态协调，达到理想的小气候环境范围。根据蓝莓全周期生长适宜环境条件，得出蓝莓多因子协调控制环境调控目标值范围。蓝莓多因子协调控制系统设定参数如表 2～表 4 所示。以 2021 年 5 月份果期的多因子调控效果为例，多因子协调控制算法控制效果对比如图 10（95 页）所示。5 月 1 日—5 月 7 日为采用多因子协调控制算法进行控制，该阶段主要以降温为主，当室内温度高于 35 ℃时会开启风机进行降温，经调控该阶段日间室内最高温度为 35.79 ℃，室内平均温度为 31.36 ℃；夜间室内最高温度为 31.18 ℃，平均温度为 26.22 ℃。日间室内最高湿度为 82.60%，平均湿度为 68.05%；夜间室内最高湿度为 82.69%，平均湿度为 77.41%。该阶段日间室外平均温度为 28.46 ℃，为了对比多因子协调控制的调控效果，选取气候相似的未调控日期进行对比。5 月 9 日—5 月 10 日为未经调控的温室环境数据，日间室外平均温度为 29.25 ℃，温室内最高气温可达 50 ℃，日间平均室内温度为 37.20 ℃，严重危害蓝莓生长发育。充分证明采用多因子协调控制算法进行控制能够较好地满足蓝莓生长所需的环境，有利于蓝莓生长发育。

表2 报警参数设置

Table 2 Alarm parameter setting

参数	室内温度/℃	室内湿度/%	室内光照/lux	室内 CO_2/‰	室外雨量/(mm·min^{-1})	室外风速/(m·s^{-1})
报警上限	50	90	100,000	1.200	2	10
报警下限	−10	10	−1	0.300	0	0

表3 不同时间段通风温度设定值

Table 3 Ventilation temperature setting values in different time periods

花果生长期		花芽分化期		休眠期		催芽期	
时间	温度/℃	时间	温度/℃	时间	温度/℃	时间	温度/℃
6:00	13	6:00	15	6:00	3	6:00	10
10:00	20	10:00	22	10:00	3	10:00	18
14:00	26	14:00	26	14:00	3	14:00	25
20:00	16	20:00	18	20:00	3	20:00	14

表4 执行机构参数设置

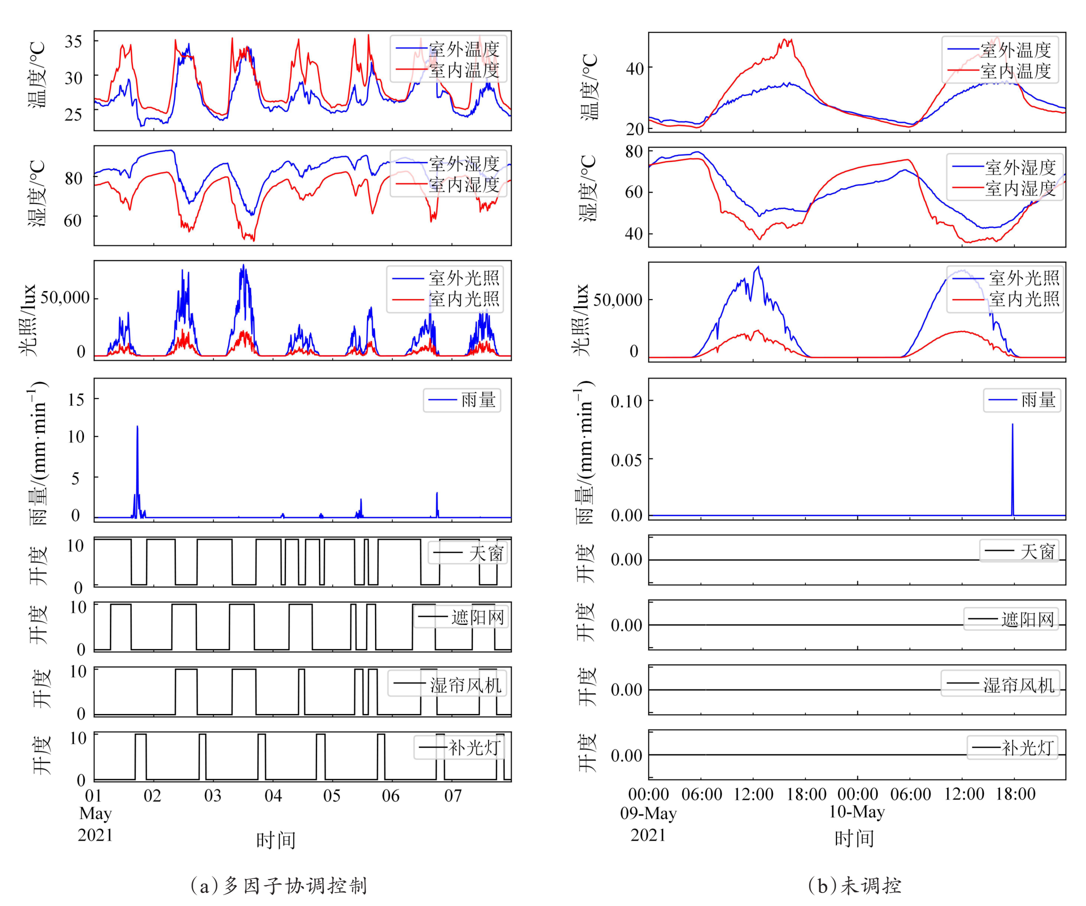
Table 4 Actuator parameter setting

	参数	值	参数	值	参数	值
天窗	期望湿度下限/%	40	低湿度正影响/℃	3	霜结温度/℃	0
	期望湿度上限/%	60	期望光照下限/lux	0	全开时间/min	6
	极限湿度下限/%	30	期望光照上限/lux	40,000	风速上限/(m·s^{-1})	3
	极限湿度上限/%	70	强光照负影响/℃	3	雨量上限/(mm·min^{-1})	0
	高湿度负影响/℃	2	弱光照正影响/℃	3		
补光灯	补光开启阈值/lux	1000	补光开启时间	8:00	补光开启月份	3
	补光关闭阈值/lux	10,000	补光关闭时间	21:00	补光结束月份	7
湿帘风机	湿帘开启室外温度/℃	28	湿帘开启室内温度/℃	35	停止阈值/℃	29
内遮阳网	展开温度上限/℃	35	内遮阳网展开时间	8:00		
	全开时间/min	12	内遮阳网折闭时间	17:00		
内保温网	展开月份	1	折闭月份	3	全开时间/min	12
	展开时间	18:00	折闭时间	7:00		
灌溉	土壤湿度下限/%	30	土壤湿度上限/%	70	灌溉室内温度/℃	23
空调	加热开启下限/℃	8	加热开启上限/℃	18		
	湿度影响上限/%	65	湿度影响下限/%	35		

4.3 实际生产效果

基于本研究总结的蓝莓生产要素与全周期调控目标，通过物联网技术与多因子协调控制算法实现的温室环境控制系统，实现了蓝莓促早熟试验。于2021年5月初采收了第一波果实，比露天栽培蓝莓多采收时间提前近一个月。室内蓝莓生长状态如图11所示，同时期室外蓝莓生长状态如图12所示。

温室内蓝莓均经过蓄冷操作，蓄冷时长约为400 h，并且采用多因子协调控制算法进行蓝莓全周期生长环境调控。通过对比发现，采用多因子协调控制算法调控的蓝莓其采摘时间主要集中在5月初至6月初，而未经调控的蓝莓采摘时间主要集中在5月底至6月底。并且采用多因子协调控制算法进行调控后，不同品种的蓝莓产量均比未经调控的产量高，单果重量也比未经调控的



（a）多因子协调控制　　（b）未调控

图10　多因子协调控制算法控制效果对比

Fig. 10 Comparison of control effects of multi-factor coordinated control algorithm



图11　室内蓝莓生长状态

Fig. 11 Growth status of indoor blueberry



图12　室外蓝莓生长状态

Fig. 12 Growth status of outdoor blueberry

重。其中，相比于未蓄冷的蓝莓植株，蓄冷后的“明星”“绿宝石”“蓝美1号”“海岸”单株产量分别增加51.5%、85.5%、43.8%和94.7%，单果重量分别增加10.9%、7.2%、2.6%和5.3%。试验证明采用多因子协调控制算法进行调控能够提高蓝莓的产量以及品质。

通过试验还可以得出“南高丛”蓝莓品种产量关系：“蓝美1号”＞“明星”，“海岸”＞“绿宝石”；单果重量关系：“绿宝石”＞“明星”＞“海岸”＞“蓝美1号”。“蓝美1号”单株产量最高，但其单果重量最低，而“明星”单株产量及单果重量均处于较优水平。通过综合对比得出选种“明星”品种的蓝莓综合效益最佳。不同品种蓝莓经蓄冷后的产量对比如表5所示。

5 结 论

本研究设计并实现了蓝莓植物工厂化温室生产控制系统。针对蓝莓无土栽培生产要素，如蓝

表5 不同品种的蓝莓蓄冷操作产量对比

Table 3 Comparison of cold storage operation yields of different varieties of blueberries

品种	环境	是否蓄冷	采摘时间	单株产量/g	单果重量/g
明星	室内	是	2021.05.08—2021.06.08	306	1.7095
	室外	否	2021.05.30—2021.06.30	202	1.5420
绿宝石	室内	是	2021.05.06—2021.05.31	211.5	1.8233
	室外	否	2021.05.30—2021.06.28	114	1.7015
蓝美1号	室内	是	2021.05.06—2021.06.12	581	0.7959
	室外	否	2021.05.30—2021.07.02	404	0.7754
海岸	室内	是	2021.05.06—2021.06.14	328	1.0349
	室外	否	2021.06.02—2021.07.04	168.5	0.9827

莓各品种生产特点、土壤pH、水肥灌溉要点、小气候环境范围等，进行了较为详细全面的调研与总结，得出了适合上海地区不同阶段的蓝莓生产环境要素。

对现有的Venlo型温室针对蓝莓生产做部署，简述了温室的地理、气候及内部结构条件等，并规划了温室蓝莓全周期调控目标。最后，基于物联网技术设计并实现了生产控制系统，为蓝莓生产环境调控提供了技术支持。

在温室环境多因子协调控制模型基础上，针对蓝莓生长环境特点，研究提出了一套蓝莓温室多因子协调控制算法，用于环境调控。调控系统能够很好地满足蓝莓生长所需环境要求，实际达到了蓝莓提前结果实上市的效果，并且有效提了高蓝莓产量与品质，可对南方蓝莓植物工厂化温室生产控制系统搭建与控制起到示范作用。

本研究开发的系统具有广泛的应用场景，不仅能很好地适用于南方地区蓝莓的生产，同样适用于其他地区的种植，只需要针对不同品种的蓝莓设定相应的生长环境调控目标值。同时，本系统还适用于其他温室作物的生产。

参考文献：

[1] 史海芝, 刘惠民. 国内外蓝莓研究现状[J]. 江苏林业科技, 2009, 36(4): 48-51.
SHI H, LIU H. The current research situation of blueberry[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science Technology, 2009, 36(4): 48-51.

[2] 聂飞, 张玉春. 我国蓝莓产业发展的机遇与挑战[J]. 北方园艺, 2014(4): 165-170.
NIE F, ZHANG Y. Development situations and prospects of vegetable industry of China[J]. Northern Horticulture, 2014(4): 165-170.

[3] 艾海波, 魏晋宏, 邱权, 等. 微型植物工厂智能控制系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(S2): 198-204.
AI H, WEI J, QIU Q. Design of intelligent control system for micro plant factory[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(S2): 198-204.

[4] 涂俊亮, 邱权, 秦琳琳, 等. 微型植物工厂内部环境调控试验平台研制及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 184-190.
TU J, QIU Q, QIN L, et al. Development and test on experimental platform for inner environment control of micro plant factory[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 184-190.

[5] 杨其长. 植物工厂现状与发展战略[J]. 农业工程技术, 2016, 36(10): 9-12.
YANG Q. Present situation and development strategy of plant factory[J]. Agricultural Engineering Technology, 2016, 36(10): 9-12.

[6] 杨玉春, 魏鑫, 孙斌, 等. 日光温室蓝莓提早成熟关键栽培技术[J]. 北方园艺, 2015(19): 209-210.
YANG Y, WEI X, SUN B, et al. Key cultivation techniques for early maturation of blueberry in sunlight greenhouse[J]. Northern Horticulture, 2015(19): 209-210.

[7] 徐立鸿, 蔚瑞华, 苏远平, 等. 一种温室环境多因子协调节能优化控制方法: CN 201710261551.7[P]. 2017.08.15.
XU L, WEI R, SU Y, et al. Multi-factor coordinated energy-saving optimization control method for greenhouse environment: CN 201710261551.7[P]. 2017.08.15.

[8] 王海波, 刘凤之, 韩晓, 等. 葡萄需冷量和需热量估算模型及设施促早栽培品种筛选[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 187-193.
WANG H, LIU F, HAN X, et al. Grape chilling requirement estimated models and heat requirement estimated models and selection of early cultivars in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 187-193.

[9] 周妍. 设施蓝莓栽培中需冷处理及栽培技术[J]. 乡村科技, 2020, 11(34): 105-106.
ZHOU Y. Cold treatment and cultivation techniques

for blueberry cultivation in facility[J]. Rural Science and Technology, 2020, 11(34): 105-106.

[10] 史军, 崔林丽, 杨涵洧, 等. 上海气候空间格局和时间变化研究[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(11): 1348-1354.
SHI J, CUI L, YANG H, et al. Spatial pattern and temporal change of climate in Shanghai[J]. Journal of Geo-information Science, 2015,17(11): 1348-1354.

[11] 施春晖, 徐方杰, 王晓庆, 等. 上海地区南、北高丛蓝莓品质及抗氧化活性比较[J]. 中国农学通报, 2013, 29(31): 201-205.
SHI C, XU F, WANG X, et al. Comparision of quality and antioxidant capacity between *Vaccinium corymbosum* land and *Vaccinium corymbosum* in Shanghai[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(31): 201-205.

[12] 裴嘉博, 李亚东, 张琛, 等. 6个高丛蓝莓品种在上海地区的引种初报[J]. 落叶果树, 2016, 48(2): 27-29.
PEI J, LI Y, ZHANG C, et al. A preliminary report on the introduction of six high cluster blueberry varieties in Shanghai[J]. Deciduous Fruits, 2016, 48(2): 27-29.

[13] 李晴晴, 鲁珊珊, 张红, 等. 乌饭树和蓝莓对不同土壤pH值的生理反应[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43(4): 469-475.
LI Q, LU S, ZHANG H, et al. Physiological response to different soil pH values between *Vaccinium bracteatum* and *Vaccinuum ashei*[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2017, 43(4): 469-475.

[14] 申岩. 蓝莓露地栽培技术[J]. 天津农业科学, 2009, 15(3): 62-64.
SHEN Y. Cultivation technology of Semen Trionellae in the open field[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2009,15(3): 62-64.

[15] YARBOROUGH D E. 栽培种矮丛越橘果园的建立与田间管理(英文)[J]. 吉林农业大学学报, 2009, 31(5): 556-560.
YARBOROUGH D E. Cultivated lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium*) establishment and management[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2009, 31(5): 556-560.

[16] 林育炯, 张均华, 胡继杰, 等. 不同类型基质对机插水稻秧苗生理特征及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 18-26.
LIN Y, ZHANG J, HU J, et al. Effects of different seedling substrates on physiological characters and grain yield of mechanized-transplanted rice[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 18-26.

[17] 狄华涛, 陈雪平, 霍恒志, 等. 蓝莓栽培土壤改良技术研究进展[J]. 现代园艺, 2021, 44(1): 44-45, 47.
DI H, CHEN X, HUO H, et al. Research progress on soil improvement techniques for blueberry cultivation[J]. Contemporary Horticulture, 2021, 44(1):44-45, 47.

[18] 黄韬, 吴春华, 王媚, 等. 温室蓝莓无土栽培技术[J]. 北方果树, 2018(3): 31-32.
HUANG T, WU C, WANG M, et al. Soil free cultivation technology of blueberry in greenhouse[J]. Northern Fruits, 2018(3): 31-32.

[19] 栗苗苗. 关于蓝莓种植的土壤改良方法[J]. 农业与技术, 2020, 40(18): 106-107.
LI M. On soil improvement methods for blueberry planting[J]. Agriculture and Technology, 2020, 40(18): 106-107.

[20] 蔡燕, 贾云霞, 穆旭东. 滴灌技术在设施蓝莓产业中的应用[J]. 河北果树, 2020(3): 52, 54.
CAI Y, JIA Y, MU X. Application of drip irrigation technology in facility blueberry industry[J]. Hebei Fruits, 2020(3): 52, 54.

[21] 赫玉霞. 浅谈蓝莓实用栽培水肥管理[J]. 新农业, 2020(15): 27.
HE Y. Talking about the water and fertilizer management of blueberry practical cultivation[J]. New Agriculture, 2020(15): 27.

[22] 解志鹏. 水肥耦合下大连蓝莓灌溉方案设计[J]. 吉林水利, 2019(5): 9-11
XIE Z. Design of Dalian blueberry irrigation scheme under the coupling of water and fertilizer[J]. Jilin Water Resources, 2019(5): 9-11.

[23] 董克锋, 姜惠铁. 影响蓝莓栽培成败的关键因素分析[J]. 北方园艺, 2015(14): 49-51
DONG K, JIANG H. Analysis of key factors affecting the success or failure of blueberry cultivation[J]. Northern Horticulture, 2015(14): 49-51.

[24] 刘露, 侯鹏, 刘泽元, 等. 适用于黄河水滴灌的灌水器筛选研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 99-107.
LIU L, HOU P, LIU Z, et al. Selection of suitable drip-emitters for Yellow river water drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(6): 99-107.

[25] CARLOS K, PEKKA S J, MARKUS T, et al. Smart water management platform: IoT-based precision irrigation for agriculture[J]. Sensors(Basel, Switzerland), 2019, 19(2): ID 276.

[26] MUANGPRATHUB J, BOONNAM N, KAJORNKASIRAT S, et al. IoT and agriculture data analysis for smart farm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 467-474.

[27] 谭钺, 徐丽, 朱三军, 等. 两个蓝莓品种冷棚栽培表现及栽培关键技术[J]. 落叶果树, 2021, 53(5): 71-72.
TAN Y, XU L, ZHU S. Performance and key cultivation techniques of two blueberry varieties in cold shed[J]. Deciduous Fruits, 2021, 53(5): 71-72.
[28] 郭俊英. 蓝莓优质高效生产技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2018.
GUO J. Blueberry high-quality and high-efficiency production technology[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2018.
[29] 张海峰, 李杨, 张宇, 等. 基于云服务的棚室蔬菜智能终端系统设计与实现——以黑龙江省为研究案例[J]. 智慧农业, 2019, 1(3): 87-99.
ZHANG H, LI Y, ZHANG Y, et al. Design and implementation of intelligent terminal service system for greenhouse vegetables based on cloud service: A case study of Heilongjiang province[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(3): 87-99.
[30] ANTONACCI A, ARDUINI F, MOSCONE D, et al. Nanostruc-tured(Bio) sensors for smart agriculture[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2018(98): 95-103.
[31] PRAKASH P J, ALI Y, DIMITRIOS G, et al. Internet of things platform for smart farming: Experiences and lessons learnt[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2016, 16(11): ID 1884.

Multi-Factor Coordination Control Technology of Promoting Early Maturing in Southern Blueberry Intelligent Greenhouse

XU Lihong*, LIU Huihui, XU He, WEI Ruihua, CAI Wentao

(*College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai* 201804, *China*)

Abstract: In order to get blueberries goes on sale in advance and obtain greater economic benefits, southern blueberries were moved to an intelligent greenhouse with controllable environment for experimental production. The early maturing production control technology of southern blueberry intelligent greenhouse was explored and studied. First, a detailed and comprehensive investigation and summary were conducted on the production factors of blueberry soilless cultivation, such as the production characteristics of various blueberry varieties, the pH and composition of the substrate, the key points of water and fertilizer irrigation, and the scope of the microenvironment climate. Then, the existing Venlo-type greenhouse was deployed for blueberry production, and the geography, climate and internal structural conditions of the greenhouse were briefly described, and the greenhouse blueberry full-cycle control goal was planned. Finally, the production control system was designed and implemented based on the Internet of Things technology, and the overall framework of the software layer, the hardware layer and the cloud were introduced. Based on multi-factor coordinated control model of greenhouse environment, according to the characteristics of blueberry growth environment, a set of blueberry greenhouse multi-factor coordinated control algorithms were proposed and used for environmental regulation. The experimental greenhouse is located in the southeast of Huaqiao Town, Kunshan city, Suzhou city, Jiangsu province. It has been verified that the overall control system has a significant effect, and the first wave of fruits was harvested in early May 2021, making the southern variety of blueberry enter the fruit picking period nearly one month earlier. Compared with the blueberry plants without cold storage, the yields per plant of "Star" "Emerald" "Lanmei No. 1", and "Coast" after cold storage increased by 51.5%, 85.5%, 43.8%, and 94.7%, respectively, and the weight of each fruit was increased 10.9%, 7.2%, 2.6%, and 5.3%, respectively. Experiments proved that the use of multi-factor coordinated control algorithms for regulation can increase the yield and quality of blueberries and achieve significant economic benefits and provide a demonstration for the industrialization of blueberry plants in southern greenhouses to promote early maturity production and management.

Key words: blueberry; cultivation management; plant factory; promoting early-ripeness; production control system; multi-factor coordination control algorithm; Internet of Things